

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого  
Институт прикладной математики и механики

Работа допущена к защите  
Директор высшей школы  
прикладной математики и  
вычислительной физики  
\_\_\_\_\_ Л.В. Уткин  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА**  
**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**  
**МЕТОД РАСЧЁТА И КОРРЕКТИРОВКИ ТРАЕКТОРИЙ ГРУППЫ**  
**МОБИЛЬНЫХ АБОНЕНТОВ НА ПРОИЗВОЛЬНОЙ КАРТЕ**  
**МЕСТНОСТИ В УСЛОВИЯХ ПОДДЕРЖАНИЯ СВЯЗНОСТИ**  
**БЕСПРОВОДНОЙ ОДНОРАНГОВОЙ СЕТИ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ**

по направлению 02.04.01 Математика и компьютерные науки  
Направленность (профиль) 02.04.01\_02 – Организация и управление  
суперкомпьютерными системами

Выполнил

студент гр. 3640201/90201

П.В. Ченцова

Руководитель

к.т.н., доцент

М.А. Курочкин

Консультант

М.В. Чуватов

Консультант

по нормоконтролю

И.Э. Голубева

Санкт-Петербург

2021

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ ПЕТРА ВЕЛИКОГО**

**Институт прикладной математики и механики**

**УТВЕРЖДАЮ**

Директор Высшей школы  
прикладной математики и  
вычислительной физики,  
д.т.н., проф.

Л.В. Уткин

«    »    2021 г.

**ЗАДАНИЕ**

**по выполнению выпускной квалификационной работы**  
студенту

Ченцовой Полине Викторовне, гр. 3640201/90201

1. Тема работы: Метод расчёта и корректировки траекторий группы мобильных абонентов на произвольной карте местности в условиях поддержания связности беспроводной одноранговой сети передачи данных
2. Срок сдачи студентом законченной работы: 5 июня 2021 г.
3. Исходные данные по работе:
  - 3.1. Цель: разработка метода расчёта траекторий движения мобильными роботами, объединенными в одноранговую беспроводную сеть, в условиях пространственно-ситуационной неопределённости.
  - 3.2. Задачи: разработка алгоритма построения топологии отказоустойчивой одноранговой беспроводной сети; исследование способов представления карты местности; исследование алгоритмов поиска пути; разработка

механизма формирования ограничений для поисковых алгоритмов на основе сетевых метрик; разработка способов построения роботами общей карты местности и корректировки траектории движения роботом на основе данных, собранных другими роботами; подготовка среды и сценариев для выполнения экспериментов; проведение экспериментальных исследований, анализ результатов и подведение итогов.

3.3. Объект исследования: группа мобильных роботов, оснащённых техническими средствами организации одноранговой беспроводной сети.

3.4. Предмет исследования: методы и алгоритмы построения отказоустойчивой топологии одноранговой беспроводной сети и расчёта индивидуальных траекторий движения каждым роботом группы в условиях пространственно-ситуационной неопределённости.

#### 4. Содержание работы:

4.1. Глава 1. Стандарты беспроводных сетей подвижных транспортных средств.

4.2. Глава 2. Управление группой мобильных абонентов на произвольной карте местности

4.3. Глава 3. Описание разработанного метода

4.4. Глава 4. Инструменты исследования

4.5. Глава 5. Практическая часть

4.6. Глава 6. Анализ полученных данных

5. Дата выдачи задания «26» января 2021 г.

Руководитель ВКР \_\_\_\_\_ Курочкин М. А.

(подпись)

Задание принял к исполнению «26» января 2021 г.

Студент \_\_\_\_\_ Ченцова П. В.

(подпись)

## РЕФЕРАТ

с. 45, рис. 12, источников литературы 16

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: РОБОТЫ, ПОИСК ПУТЕЙ, МАРШРУТИЗАЦИЯ, БЕСПРОВОДНЫЕ ОДНОРАНГОВЫЕ СЕТИ, ОТКАЗОУСТОЙЧИВОСТЬ, КАНАЛ СВЯЗИ, АЛГОРИТМ ДЕЙКСТРЫ

Тема выпускной работы: метод расчета и коорректировки траекторий группы мобильных абонентов на произвольной карте местности в условиях поддержания связности беспроводной одноранговой сети передачи данных.

Данная работа посвящена разработке алгоритма движения роботов в условиях поддержания отказоустойчивой одноранговой беспроводной сети.

Задания, которые были выполнены в ходе работы:

- Разработан алгоритм построения топологии отказоустойчивой одноранговой беспроводной сети;
- Проведено исследование способов представления карты местности;
- Проведено исследование алгоритмов поиска пути;
- Разработан механизм формирования ограничений для поисковых алгоритмов на основе сетевых метрик;
- Разработаны способы построения роботами общей карты местности и корректировки траектории движения роботом на основе данных, собранных другими роботами;
- Подготовлена среда и сценарии для выполнения экспериментов;
- Проведены экспериментальные исследования, сделан анализ результатов, подведены итоги.

## ABSTRACT

p. 45, fig. 12, literature sources 16

**KEYWORDS:** ROBOTS, PATH FINDING, ROUTING, WIRELESS SINGLE-TO-RATE NETWORKS, FAILURE RESISTANCE, COMMUNICATION CHANNEL, DYKSTRA ALGORITHM

The theme of the final work: a method of calculating and correcting the trajectories of a group of mobile subscribers on an arbitrary map of the area while maintaining a wireless peer-to-peer data transmission network.

This work is devoted to the development of an algorithm for the movement of robots while maintaining a peer-to-peer wireless network without falls.

Tasks that were completed in the course of work:

- An algorithm for constructing a topology of a fault-tolerant peer-to-peer wireless network has been developed;
- Conducted a study of ways to present a map of the area;
- Research of pathfinding algorithms was carried out;
- Developed a mechanism for limiting the search for algorithms based on network metrics;
- Methods have been developed for robots to build a general map of the area and adjust the trajectory of the robot based on data collected by other robots;
- Prepared environment and scenarios for performing experiments;
- Experimental studies have been carried out, the results have been analyzed, the results have been summed up.

# САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ.....</b>	<b>7</b>
<b>Глава 1. Стандарты беспроводных сетей подвижных транспортных средств .....</b>	<b>10</b>
1.1. Стандарт 802.11p.....	10
1.2. Стандарт 802.11s .....	12
1.3. Выводы к главе 1 .....	13
<b>Глава 2. Управление группой мобильных абонентов на произвольной карте местности .....</b>	<b>14</b>
2.1. Типы алгоритмов поиска пути .....	14
2.2. Типы построения системы планирования.....	15
2.3. Выводы к главе 2 .....	16
<b>Глава 3. Описание разработанного метода.....</b>	<b>18</b>
3.1. Математическая модель .....	18
3.2. Общее описание алгоритма .....	20
3.3. Описание дополнения .....	22
3.4. Выводы по главе 3 .....	23
<b>Глава 4. Инструменты исследования .....</b>	<b>24</b>
4.1. Расчет местоположения роботов.....	24
4.2. Моделирование сетевого трафика .....	24
4.3. Параметризация .....	25
4.4. Обход тупиковых ситуаций .....	26
4.5. Выводы к главе 4 .....	26
<b>Глава 5. Практическая часть .....</b>	<b>28</b>
5.1. Карта высот .....	28
5.2. Моделирование сетевого трафика .....	28
5.3. Разработка тестовых сценариев .....	29
5.4. Выводы по главе 5 .....	34
<b>Глава 6. Анализ полученных данных .....</b>	<b>35</b>
6.1. Влияние корректировок на пропускную способность системы.....	35
6.2. Зависимость времени прохождения карты от количества роботов .....	38
6.3. Зависимость восстановления карты роботами в зависимости от их количества .....	40
6.5. Выводы по главе 6 .....	41
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>	<b>42</b>
<b>СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....</b>	<b>43</b>





## ВВЕДЕНИЕ

Последнее время человечество задумывается о нехватке ископаемых ресурсов, все чаще требуется изучение новых мест зарождений, в том числе и труднодоступные территории.

Один из вариантов решения этой проблемы – использование роботов. Однако отправка только одного робота в места повышенной опасности может не только привести к тому, что необходимая информация не будет собрана, но и к тому, что сам робот будет утерян, так как сети не могут покрывать большие расстояния. Система же роботов, в отличие от одного абонента, может обладать следующими свойствами:

- Надежность (потеря одного абонента не понесет за собой снижение работоспособности всей системы)
- Гибкость (возможность обходить множество участков)
- Неограниченное число роботов

Помимо исследования новых территорий существует еще множество применений групп мобильных абонентов:

- Мониторинг окружающей среды
- Спасательные операции
- Военная разведка
- Патрулирование и многое другое

Для продуктивного взаимодействия таких систем есть потребность в максимально эффективной и своевременной передаче информации между абонентами.

Для этого, в частности, активно исследуются и развиваются решения, направленные на организацию и функционирование децентрализованных – одноранговых – сетей. Благодаря распределению координирующих работу сети функций и задач между равноправными узлами такие сети демонстрируют более высокие показатели отказоустойчивости и способности выдерживать высокие нагрузки. Наиболее широкое распространение одноранговые сети получили в беспроводных окружениях, где включение узлов в сеть и исключение их из сети, равно как и изменение связности с другими узлами,

осуществляется без привлечения квалифицированного персонала и без необходимости изменения или доработки инфраструктуры.

## **Актуальность**

На данный момент есть множество методов поиска путей в различных средах:

- Методы поиска пути по графу
- Методы обхода препятствий
- Интеллектуальные алгоритмы

Все эти алгоритмы основываются на независимом друг от друга поиске траекторий.

Так как территории могут быть достаточно больших размеров, то поиск траекторий без обмена информацией может привести либо к полной потере роботов, либо к повторному обходу одних и тех же объектов, что, в свою очередь, может привести к увеличению времени и снижению эффективности.

При построении траекторий в общей сети роботы могут обмениваться информацией о своем местоположении, об уже обойденных объектах и внезапных препятствиях.

## **Цели и задачи**

Целью данной работы является разработка метода поиска траекторий мобильных абонентов в беспроводной одноранговой сети, учитывающего не только физические и информационные характеристики каналов связи, такие как: уровень сигнала, отношение сигнал/шум, число абонентов, разделяющих доступ к среде, пропускная способность канала, доля потерянных пакетов, число ретрансляций до узла назначения, но также использующего данные о местоположении узлов в пространстве. Особое внимание уделено следующим параметрам:

- Процент потерянных пакетов.

- Число ретрансляторов

Таким образом, были выделены следующие задачи:

- Исследование существующих методов.
- Разработка метода поиска траекторий.
- Реализация модели движения в однораговой беспроводной сети.
- Сравнение и оценка методов

Для разработки метода необходимо выбрать среду моделирования движения и передачи пакетов, сформировать различные сценарии передачи сетевого трафика в условиях группового передвижения объектов, провести ряд экспериментов на разных картах.

# Глава 1. Стандарты беспроводных сетей подвижных транспортных средств

В настоящее время основными стандартами, применяемыми для организации беспроводных одноранговых сетей, являются стандарты 802.11s и 802.11p. Эти стандарты описывают нижние уровни эталонной сетевой модели OSI/ISO или модели стека TCP/IP. Модели представлены на рисунке 1.1.

<b>TCP/IP</b>	<b>OSI</b>	<b>Тип данных</b>	<b>Функции</b>
<b>Прикладной</b>	<b>7. Прикладной</b>	<b>Данные</b>	<b>Доступ к сетевым службам</b>
	<b>6. Представления</b>		<b>Представление и шифрование данных</b>
	<b>5. Сеансовый</b>		<b>Управление сеансом связи</b>
<b>Транспортный</b>	<b>4. Транспортный</b>	<b>Сегменты/ дейтаграммы</b>	<b>Прямая связь между конечными пунктами и надёжность сеансом связи</b>
<b>Сетевой</b>	<b>3. Сетевой</b>	<b>Пакеты</b>	<b>Определение маршрута и логическая адресация</b>
<b>Канальный</b>	<b>2. Канальный</b>	<b>Биты, кадры</b>	<b>Физическая адресация</b>
	<b>1. Физический</b>	<b>Биты</b>	<b>Работа со средой передачи, сигналами и двоичными данными</b>

Рисунок 1.1. Сетевые модели TCP/IP и OSI

## 1.1. Стандарт 802.11p

Стандарт 802.11p является дополнением к семейству стандартов 802.11, определяющим обмен данными между движущимися транспортными средствами и дорожной инфраструктурой – Vehicle-to-Infrastructure – или непосредственно между автомобилями – Vehicle-to-Vehicle [9]. Для установления связи используется диапазон частот 5.85-5.925 ГГц. Подвижные передатчики, размещаемые на транспортных средствах, именуются On-Board Unit, стационарные, размещаемые на неподвижных объектах дорожной инфраструктуры, именуются Road-Side Unit. Сеть может включать как подвижные и стационарные узлы, так и только подвижные. Необходимость разработки специализированного стандарта для применения в сетях движущихся транспортных средств, описывающего нижние уровни сетевых

моделей, обусловлена короткими временными интервалами, в течение которых движущиеся автомобили находятся в пределах дальности связи приемопередатчиков. По этой причине установление соединения между узлами должно выполняться за возможно кратчайшее время, чтобы предоставить большее время для передачи полезных данных.

В этой связи стандарт 802.11p не решает задач ассоциации абонента с сетью и его аутентификации, для этого необходимо использовать стандарты, описывающие более высокие уровни сетевых моделей. В настоящее время 802.11p принят в качестве основы стека протоколов DSRC/WAVE, вышележащие уровни которого описаны семейством стандартов IEEE 1609 и определяют архитектуру и дополнительный набор служебных функций и интерфейсов, которые обеспечивают безопасный механизм радиосвязи между движущимися транспортными средствами. Эти стандарты разработаны для таких приложений, как, например, организация дорожного движения, контроль безопасности движения, автоматизированный сбор платежей, навигация и маршрутизация транспортных средств.

Кроме того, поверх стандарта 802.11p может быть развернут стек протоколов TCP/IP для функционирования привычных пользовательских приложений и сервисов. В модели OSI/ISO стандарт 802.11p описывает физический уровень и уровень управления доступом к среде. Ширина одного канала 802.11p составляет 10 МГц, поддерживаемые режимы битовой скорости: 3, 4.5, 6, 9, 12, 18, 24, 27 Мбит/с, используются схемы модуляции BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM. Эти параметры были выбраны разработчиками стандарта исходя из характеристик распространения радиосигнала в городских условиях, когда сигнал отражается от других автомобилей и зданий. Для синхронизации времени в стандарте описан специальный кадр, а единственной временной привязкой является UTC.

## 1.2. Стандарт 802.11s

Стандарт 802.11s является дополнением к семейству стандартов 802.11, предназначенным для организации одноранговых беспроводных сетей малоподвижных или стационарных топологий [3]. Данный стандарт описывает второй уровень эталонной сетевой модели OSI/ISO – уровень управления доступом к среде, тогда как первый – физический – уровень описывается прочими стандартами семейства 802.11, например, 802.11n или 802.11ac. Узлы одноранговой сети 802.11s именуются Mesh Station, а соединения между узлами, находящимися в прямой видимости, формируют топологии, которые не подвержены частым изменениям. Это объясняется тем, что для частых изменений топологии сети требуются механизмы быстрого установления соединения, которые описываются физическим уровнем эталонной сетевой модели и не покрываются данным стандартом. Кроме того, в отличие от стандарта 802.11p, рассматриваемый стандарт решает задачи установления безопасного соединения на основе аутентификации по предварительно разделяемому ключу с последующим использованием протокола Диффи-Хеллмана для получения секретного ключа. Эти этапы также затрачивают эфирное время на обмен служебными сообщениями.

Отличительная особенность по сравнению с сетями Wi-Fi заключается в возможности ретрансляции пакетов абонентскими устройствами, тогда как сеть Wi-Fi допускает лишь передачу между абонентским устройством и базовой станцией, с которой оно ассоциировано. Данные о соединениях между узлами и сформировавшейся топологии используются протоколами маршрутизации для нахождения пути – списка узлов-ретрансляторов, через которые необходимо осуществить пересылку сообщения от источника к получателю. В зависимости от используемого стандарта физического уровня могут применяться каналы шириной до 40 МГц в частотных диапазонах 2.412-2.472 ГГц и 5.030-5.875 ГГц с использованием схем модуляции BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM. Поддерживаемые битовые скорости достигают 54 Мбит/с.

Несмотря на недостаток в виде длительного, по сравнению с 802.11p, процесса изменения сетевой топологии, стандарт 802.11s часто применяется в

научных и исследовательских задачах, связанных с исследованиями в области одноранговых беспроводных сетей подвижных абонентов, по причине доступности оборудования и программного стека.

### **1.3. Выводы к главе 1**

В первой главе были рассмотрены основные стандарты, определяющие особенности построения одноранговых беспроводных сетей. Также было рассказано, какие уровни описывают данные стандарты в эталонной сетевой модели. В дальнейшем для реализации будет использоваться дополнение к стандарту 802.11 – 802.11р, работающий в частотных диапазонах 5.85-5.925 ГГц, ширина одного канала 802.11р составляет 10 МГц, поддерживаемые режимы битовой скорости: 3, 4.5, 6, 9, 12, 18, 24, 27 Мбит/с. В данной работе будет использован режим 6Мбит/с.

## **Глава 2. Управление группой мобильных абонентов на произвольной карте местности**

При функционировании роботов в недостаточно известной обстановке планирование траекторий, позволяющих строить надежное безаварийное сообщение между узлами, является одной из важнейших задач. Сложность поиска путей состоит не только в наличии статических препятствий, но и присутствие в среде большого количества мобильных абонентов, движение которых в большинстве случаев рассматривается как случайный процесс с неизвестными параметрами.

### **2.1. Типы алгоритмов поиска пути**

#### **Алгоритмы обхода препятствий**

Одной из важнейших задач при поиске траекторий является обход препятствий. Построение траектории в недетерминированной среде с динамическими препятствиями – самая актуальная из подзадач поиска путей.

Сфера применения роботов, способных автономно передвигаться в данной среде, практически не ограничена. Возможность решения этой подзадачи на сегодняшний день зависит от множества факторов, таких как скорость движения подвижных объектов, возможность приближенно предсказать местонахождение препятствий в следующий момент времени и многих других.

#### **Методы поиска пути по графу**

В робототехнике часто используют такие алгоритмы поиска по графу, как классические: «поиск в ширину», его более быстрая модификация – «двунаправленный поиск в ширину» и «алгоритм Дейкстры», так и их более глубокие модернизации – «поиск в глубину (DFS)», «Алгоритм последовательных приближений при поиске в глубину (IDDFS)», «лучший-первый» и т.д.



Высокой эффективностью при поиске путей близких к оптимальным по графу является алгоритм  $A^*$ , который пошагово просматривает все пути, ведущие от начальной вершины в конечную, пока не найдёт минимальный. При этом алгоритм просматривает сначала те маршруты, которые «кажутся» ведущими к цели, при этом он корректно сочетает в себе такие свойства, как учет длины предыдущего пути (алгоритма Дейкстры), так и эвристику из алгоритма «лучший-первый».

### **Интеллектуальные алгоритмы**

Среди интеллектуальных методов поиска траекторий внимание также заслуживают генетические алгоритмы и нейросетевые реализации систем планирования. Используя алгоритм градиентного поиска по матрице состояний, возможно формирование пути, близкого к оптимальному.

## **2.2. Типы построения системы планирования**

### **Централизованный**

Построение системы планирования по централизованному варианту предполагает решение задачи позиционирования группы в едином центре, то есть размещение всех вычислительных функций системы в общем центральном блоке (ЦБ). ЦБ по имеющейся информации о конфигурации рабочего пространства выполняет формирование нейронных карт для каждого из агентов, а также расчет траекторий с учетом скоростей и разрешение возможных конфликтных ситуаций. Стоит также отметить, что вычислительные операции НС и конструктора пути (КП) для каждого агента выполняются параллельно в отдельных потоках с доступом к общим программным ресурсам. Агенты, в свою очередь, лишь принимают по каналам данных управляющие сигналы и в соответствии с ними приводят в действие исполнительные механизмы, то есть безоговорочно выполняют «указания» центра

## **Гибридный**

При применении гибридного подхода система планирования реализуется с общим блоком конструктора пути и распределенной НС Хопфилда. В данном исполнении каждый из агентов оснащается вычислительным блоком НС, формирует собственную нейронную карту и производит ее динамическую корректировку по начальным данным и сенсорной информации о рабочем пространстве. Сформированную нейронную карту агент по каналу связи передает в общий вычислительный блок, который запускает процесс расчета траектории в отдельном потоке и выдачу управляющих сигналов. Управляющие команды ЦБ не подлежат к обязательному исполнению агентом, так как в процессе движения агент может получать новые «знания» о рабочей зоне и в соответствии с ними корректировать нейронную карту. После обновления карты агент передает эти данные в центральный конструктор пути, который (при необходимости) производит асинхронную коррекцию траектории от текущего местоположения.

## **Децентрализованный**

При реализации системы планирования по децентрализованной схеме каждый агент имеет собственную систему расчета траектории с вычислительным блоком НС и конструктором пути. Во время выполнения задачи группового позиционирования агенты, приобретая новые «знания» об окружающем пространстве, обмениваются данным с ближайшим окружением по каналам связи. На основании полученной глобальной информации агенты самостоятельно корректируют свои траектории и разрешают конфликтные ситуации.

## **2.3. Выводы к главе 2**

Во второй главе были рассмотрены основные типы алгоритмов поиска путей и построения систем планирования. Приведены примеры по каждому типу метода: поиск пути с препятствиями – SIPP, поиск на графах –  $A^*$ , поиск с

помощью интеллектуальных систем – градиентного поиска по матрице состояний.

Каждый из них может применяться в решении поставленной задачи, но я возьму за основу один из алгоритмов поиска пути с препятствиями – AA-SIPP и децентрализованный подход построения системы планирования.

## Глава 3. Описание разработанного метода

Существующие алгоритмы управления группами роботов в неопределенной среде не поддерживают постоянную связь роботов в беспроводной одноранговой сети, а также не учитывают физические и информационные характеристики каналов связи, такие как: уровень сигнала, отношение сигнал/шум, число абонентов, разделяющих доступ к среде, пропускная способность канала, доля потерянных пакетов, число ретрансляций до узла назначения. Также предлагаемый метод учитывает радиус действия приемопередатчика узла и количество соединений между узлами.

Предполагается, что учет всех этих параметров позволит создать надежную систему, которая исключает потерю абонентов в ходе движения, и при этом создать оптимальное число ретрансляторов для ускорения взаимодействия роботов в подгруппах. В качестве основы из алгоритмов поиска путей были взяты такие этапы, как: выбор соседей, поиск траекторий, обход препятствий, добавлен параллельный поиск последующего шага для всех абонентов, для поиска которого были введены дополнительные матрицы.

### 3.1. Математическая модель

Стоит отметить, что несмотря на то, что Земля – геоид, и с ней связана астрономическая система координат, а большая часть расчетов, которые требуется произвести в данной работе, связана с геометрией, нам удобнее использовать декартову систему координат.

Местоположение каждого узла описывается тремя координатами (x, y, z).

Пусть есть две точки:

- А с координатами  $(x_a, y_a, z_a)$ ,
- В с координатами  $(x_b, y_b, z_b)$ .

Тогда расстояние S между ними (рисунок 3.1) будет равно:

$$S = \sqrt{(x_b - x_a)^2 + (y_b - y_a)^2 + (z_b - z_a)^2}$$

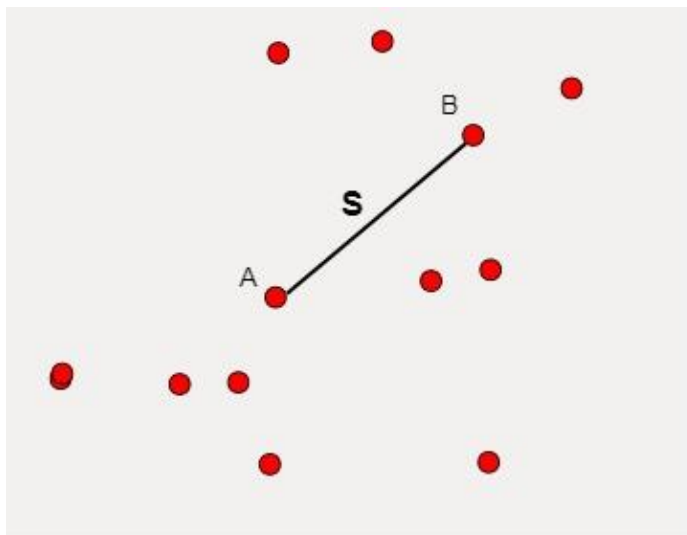


Рисунок 3.1. Расстояние между двумя точками.

Каждый узел характеризуется следующими параметрами:

- начальные координаты  $(x_0, y_0, z_0)$
- время  $T_0$
- максимальный угол подъема/спуска  $\alpha$
- максимальный коэффициент проходимости  $k$
- мощность передатчика  $P$

Для вычисления угла подъема/спуска между двумя местоположениями воспользуемся следующей формулой:

$$\alpha = \arctan\left(\frac{\Delta h}{S}\right)$$

Был реализован алгоритм поиска траекторий, к нему добавлен параллельный поиск путей для множества агентов с учетом местоположения всех узлов в каждый момент времени.

В поиск соседей были добавлены следующие проверки:

- Проверка на связность в момент времени  $t + 1$
- Проверка на сетевую надежность в момент времени  $t + 1$  (количество переходов от каждого узла не менее двух)
- Проверка на число ретрансляторов (количество не должно превышать число  $r$  – входной параметр)

После расчета всех шагов в момент времени  $t + 1$  происходит проверка на качество сигнала и последующая корректировка шагов.

Для проверки качества сигнала используется следующая формула:

$$P_d = P_0 - 10 n \lg \left( \frac{d}{d_0} \right)$$

$d$  — расстояние от устройства до передатчика;

$d_0$  — расстояние от устройства до точки, на которой выполнялось измерение мощности сигнала устройства (выбранное единичное (калибровочное) расстояние, 1 м);

$\lg$  — десятичный логарифм;

$P_0$  — мощность сигнала устройства, измеренная на единичном расстоянии  $d_0$  от устройства, dBm;

$n$  — коэффициент потерь мощности сигнала при распространении в среде, безразмерная величина

В ходе работы над моделированием движения группы роботов в условиях поддержания связности беспроводной одноранговой сети передачи данных был разработан алгоритм, далее был выдвинута гипотеза, что результаты работы можно будет улучшить, если ввести дополнительный пункт, в итоге проведены эксперименты в разных условиях с различными параметрами, произведено сравнение, выделены сильные и слабые стороны.

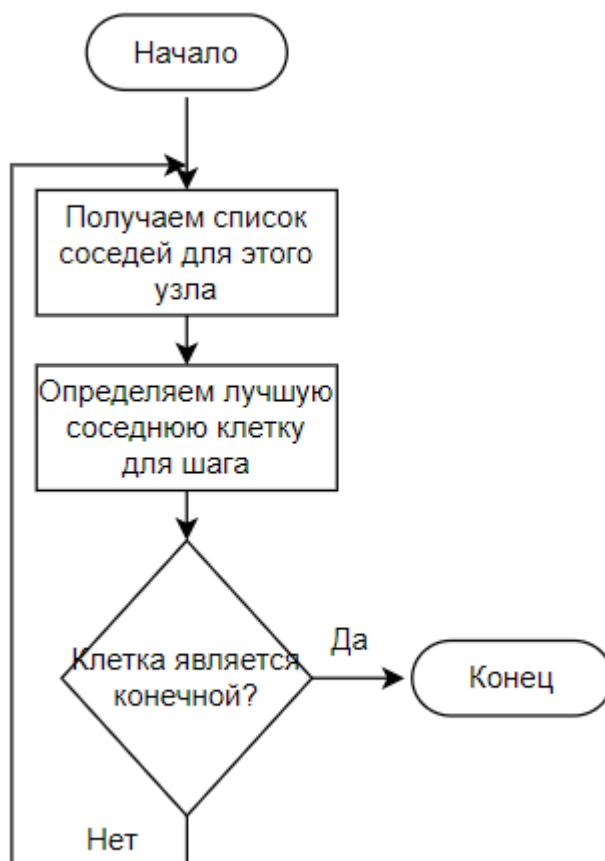
### 3.2. Общее описание алгоритма

**Входные данные:** у каждого робота есть начальное местоположение на карте и область, в которую в итоге надо попасть;

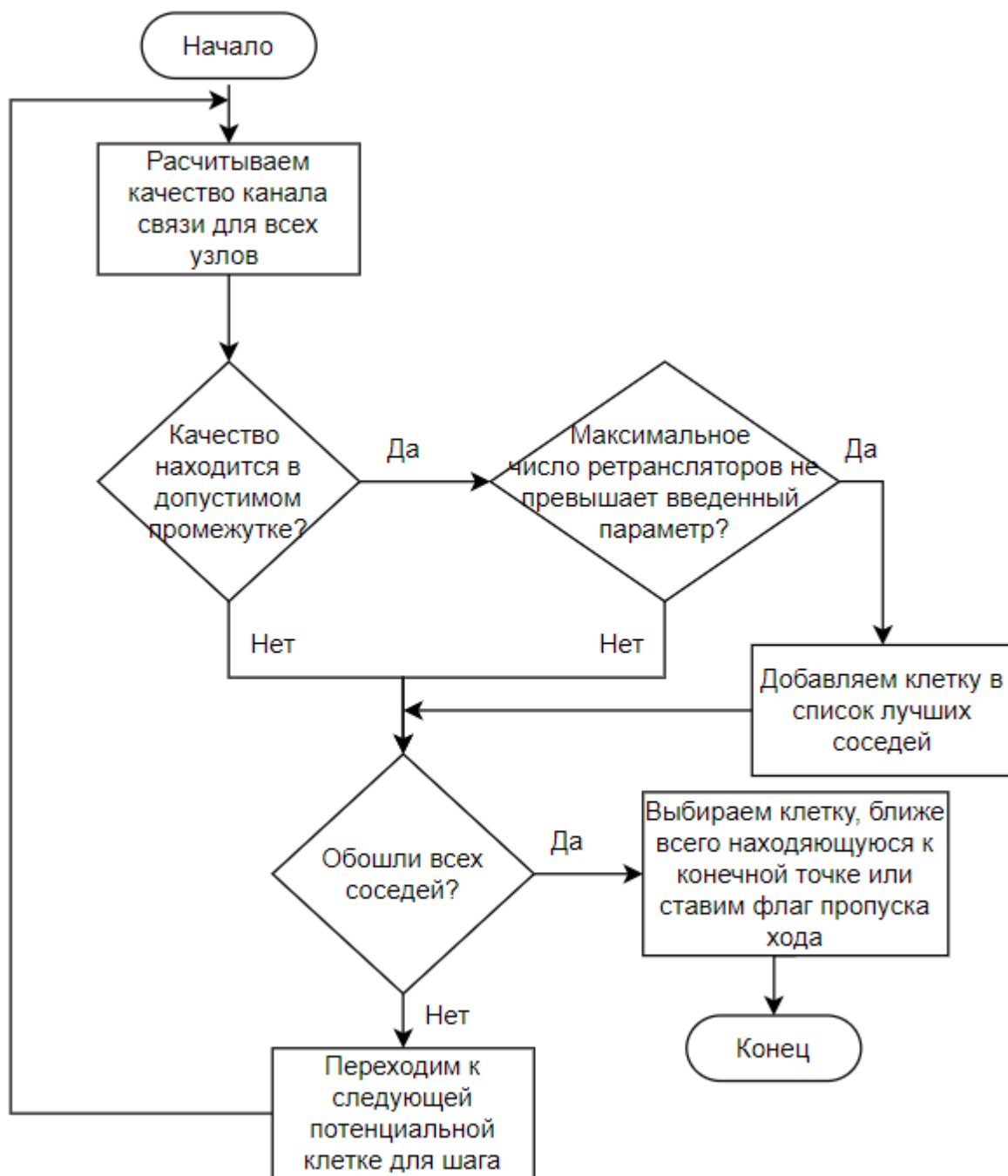
Перед каждым следующим шагом происходит выбор потенциальных координат-соседей, в которые может шагнуть робот, далее из этих соседей выбирается лучший по метрике, рассчитываемой от качества каналов связи между узлами и числа ретрансляторов.

Действия повторяются, пока все роботы не достигнут цели. Если какой-то из роботов достигнуть цели при таких параметрах не сможет — поиск завершается.

Блок-схема алгоритма поиска траектории представлена ниже:



Блок-схема алгоритма определения следующего шага выглядит так:



### 3.3. Описание дополнения

Как дополнение к уже реализованному методу было добавлено предрасчитанное распределение роботов в заданном порядке для избежания «кучкования».



Центральным узлом выбирается робот с наибольшим количеством связей, от его координаты формируются треугольники по заданному правилу. Каждому узлу находится пара координат из множества вершин треугольников. Далее центральный узел просчитывает шаг для себя, и передает информацию о своем шаге другим узлам. Остальные узлы также просчитывают свой шаг, но определяющим при этом становится направление шага центрального узла.

### **3.4. Выводы по главе 3**

В данной главе было приведено описание и математическая модель разработанного метода, а также дополнение к нему. Сам метод заключается в наборе модифицированных алгоритмов, рассчитывающих движение децентрализованного робота, также поддерживается локальный поиск выхода из труднодоступных мест. Основная мысль методов в дополнительной обработке данных для улучшения параметров сети. Был разработан и реализован алгоритм PP\_Net, а также дополненный PP\_Net-C.

## **Глава 4. Инструменты исследования**

Для исследования был написан симулятор движения на открытой местности с поддержкой упрощенного моделирования сетевого трафика.

Симуляция движения поддерживает как предрасчитанный путь, так и динамическую корректировку маршрута во время движения в соответствии с вводимыми параметрами. На данный момент возможно добавление угла наклона каждого из роботов, обход динамически возникающих препятствий, ограничение по нижней и верхней границе числа связей, ограничение числа ретрансляторов, к которому будет стремиться система связанных роботов. Есть возможность запустить роботов выстроенных определенным способом, далее роботы будут придерживаться строя, если это возможно. Такой тип расчета также включает в себя возможность динамической корректировки пути.

### **4.1. Расчет местоположения роботов**

Так как карта представлена сеткой, робот может шагнуть из клетки, в которой находится, в восьми направлениях, поэтому первоначальная генерация маршрута без учета параметров определяет наикратчайший путь робота.

При добавлении параметра угла наклона, в список соседних клеток перестают попадать такие клетки, при переходе на которые угол наклона окажется более заданного параметра.

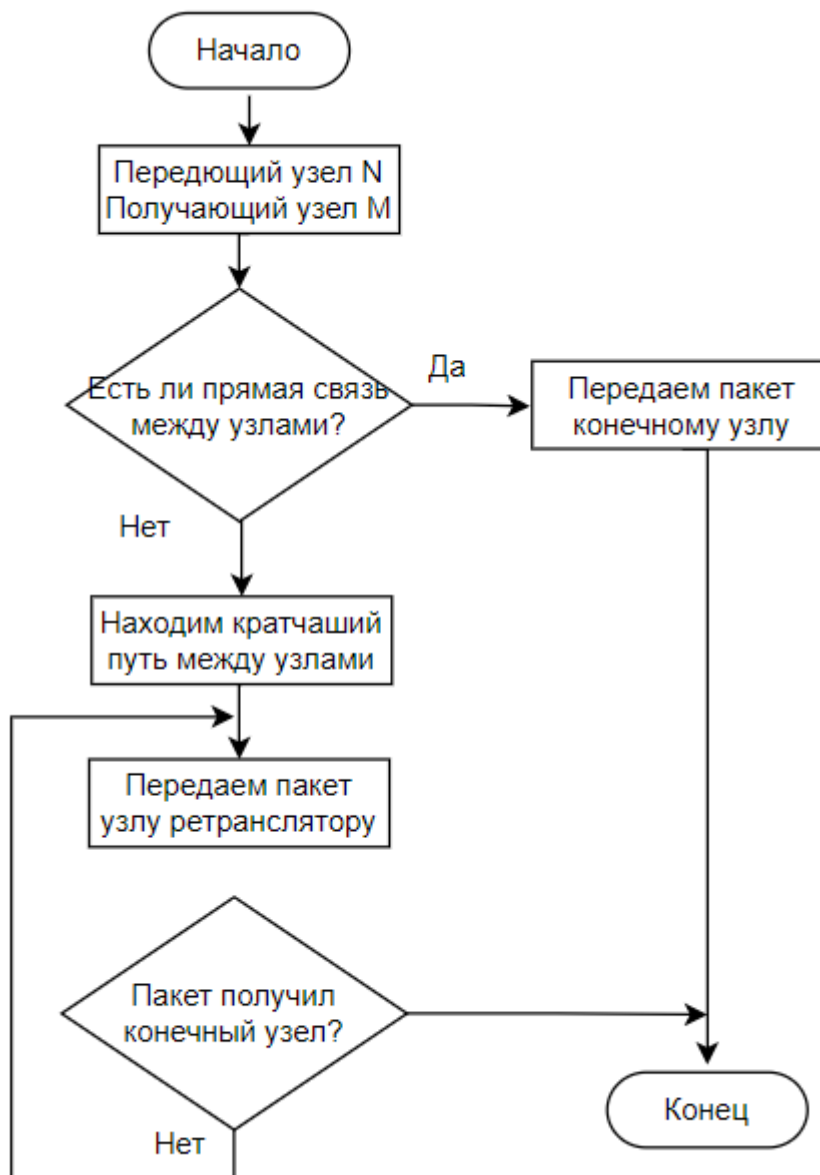
Если перед роботом оказывается препятствие в виде другого мобильного абонента, робот делает остановку, и ждет, пока тот не уедет.

### **4.2. Моделирование сетевого трафика**

Для моделирования сетевого трафика был добавлен метод, имитирующий передачу пакетов между всеми узлами. Для каждого момента времени по позициям роботов просчитывается матрица связности, по ней с помощью алгоритма Дейкстры ищутся кратчайшие маршруты от каждого до каждого робота, далее по этим маршрутам передаются данные. Количество переданных пакетов зависит от качества каналов связи и их количества. Соответственно,

если канал был сильно зашумлен или имело место большое количество ретрансляторов, то возможна большая потеря пакетов.

Блок-схема алгоритма передачи данных между двумя роботами следующая:



### 4.3. Параметризация

Для учета каждого из таких параметров как:

- Угол наклона
- Число ретрансляторов
- Количество связей

Был написан метод по отбору лучшего соседа, в котором сначала просчитывается матрица связей и матрица, содержащая в себе качество связи по каждому из каналов. Есть минимально допустимое качество и оптимальное – если качество оптимальное или же выше – смотрим на количество ретрансляторов, если их количество также оптимально – выбираем соседа, ближайшего к конечной области. Если же количество ретрансляторов превышает желаемое – если это возможно, распределяем роботов так, чтобы качество связей было оптимальным, если нет – продолжаем движение таким строем и ждем следующей возможности.

#### **4.4. Обход тупиковых ситуаций**

Так как роботы не имеют представления о карте и строят траектории сами для себя на основе данных, полученных с различных датчиков, а алгоритм не подразумевает прохождение по точкам, по которым уже ходил робот, существуют такие ситуации, в которых робот может загнать себя в безвыходное положение, что может повлечь за собой как минимум потерю этого робота, а как максимум, и еще части роботов в случае, если этот был единственным связывающим элементом. Для избежания подобных ситуаций, к целям роботов была добавлена задача построения общей карты местности, где будут отмечаются непроходимые траектории. Также был добавлен метод выхода из тупика при невозможности шагнуть на новую территорию.

#### **4.5. Выводы к главе 4**

В главе 4 были описаны разработанные инструменты для исследования. Были описаны такие моменты, как расчет местоположения робота в пространстве, реализованная упрощенная модель сетевого трафика, а также методы параметризации для корректировки траекторий. Описан недостаток изначального алгоритма, добавлен функционал выхода из тупиковых ситуаций и недопустимость попадания в одни и те же тупики.



## Глава 5. Практическая часть

Для проведения экспериментов из свободных источников была скачана карта ландшафтов в гористой и равнинной местностях. Формат скачанного файла – GeoTiff.

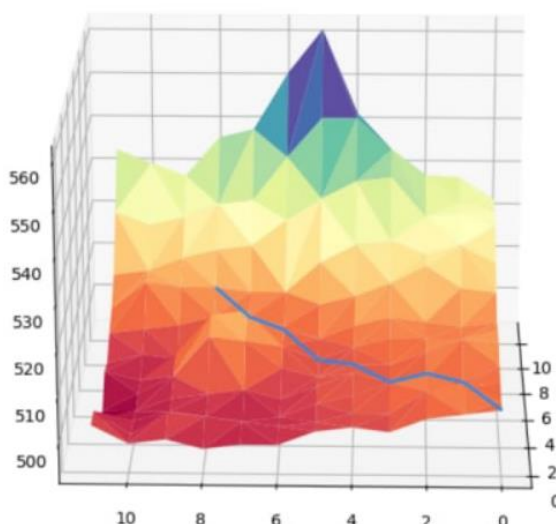
Одной из целей работы было посмотреть, как можно избежать попадания в тупик на карте с неизвестным рельефом при помощи построения карты роботами, поддерживающими постоянную связь. За счет построения карты можно избегать попадания в ловушки, куда уже попали другие роботы.

Еще одной целью было проверить, насколько вырастет пропускная способность при разрежении эфира и поддержании постоянной связи.

Недостатки – невозможность достичь цели.

### 5.1. Карта высот

Для наглядности карта высот была загружена в программу и нарисована градиентная модель. Ниже представлен пример карты высот гористой местности с уже прорисованным примерным маршрутом:



### 5.2. Моделирование сетевого трафика

Для моделирования сетевого трафика был добавлен метод, имитирующий передачу пакетов между всеми узлами. Для каждого момента времени по позициям роботов просчитывается матрица связности, по ней с помощью

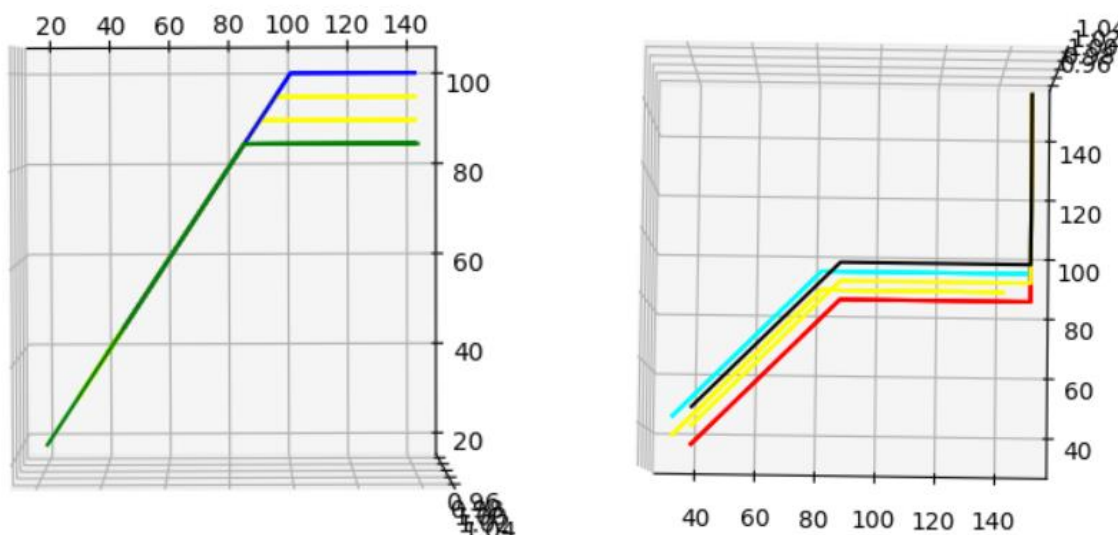
алгоритма Дейкстры ищутся кратчайшие маршруты от каждого до каждого робота, далее по этим маршрутам передаются данные. Количество переданных пакетов зависит от качества каналов связи и их количества. Соответственно, если канал был сильно зашумлен или имело место большое количество ретрансляторов, то возможна большая потеря пакетов.

### 5.3. Разработка тестовых сценариев

Так как в условиях беспроводной сети робот может легко потеряться, важно было создать надежную систему взаимодействия роботов во время движения. Для того чтобы исключить пропадание связи был добавлен метод, корректирующий движение роботов, если матрица связностей в момент времени  $t + 1$  теряет связь одного из узлов со всеми остальными. Для тестирования этого метода были составлены следующие сценарии:

Случайно сгенерированные роботы начинают движение из одного угла карты в другой на плоскости и в гора.

Как мы можем заметить, на картинке снизу практически всю дорогу роботы шли одной цепочкой, что плохо сказывается на качестве связи, с помощью модификации начального алгоритма было достигнуто следующее улучшение:

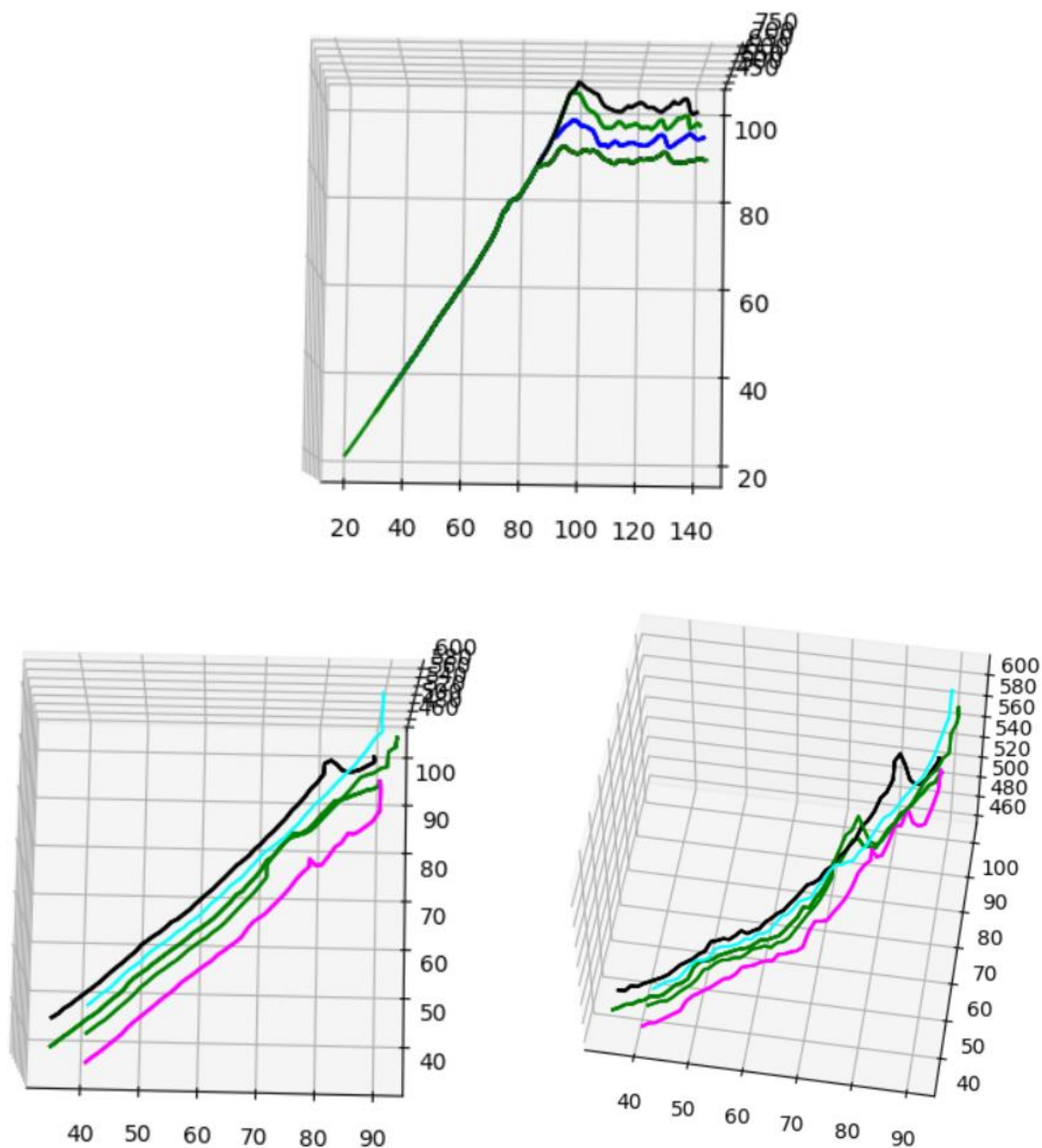


На этой же картинке мы видим, что практически весь путь роботы шли на хорошем расстоянии друг от друга, что позволило повысить качество связи, и, как следствие, повысить количество переданных пакетов. Прямая в конце не означает, что роботы в пошли цепочкой, мы видим, что один из них уже пришел в свою конечную точку, остальным же пришлось скорректировать свои траектории, для того чтобы не потерять связь в роботом, путь которого обозначен черным цветом.

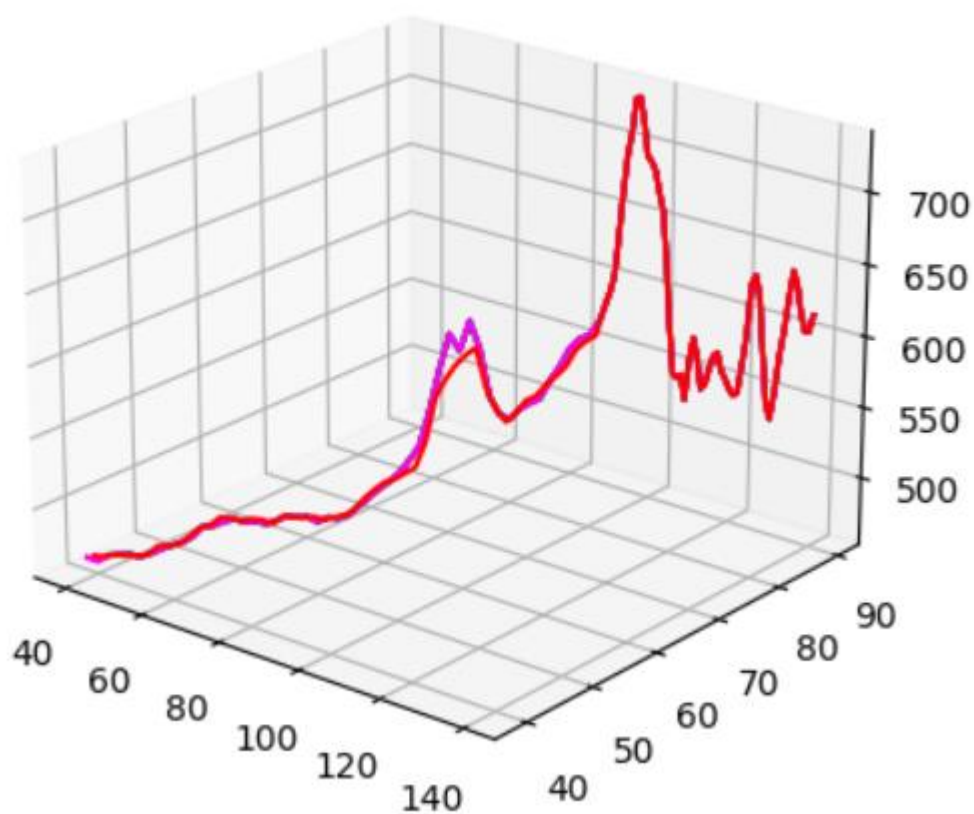
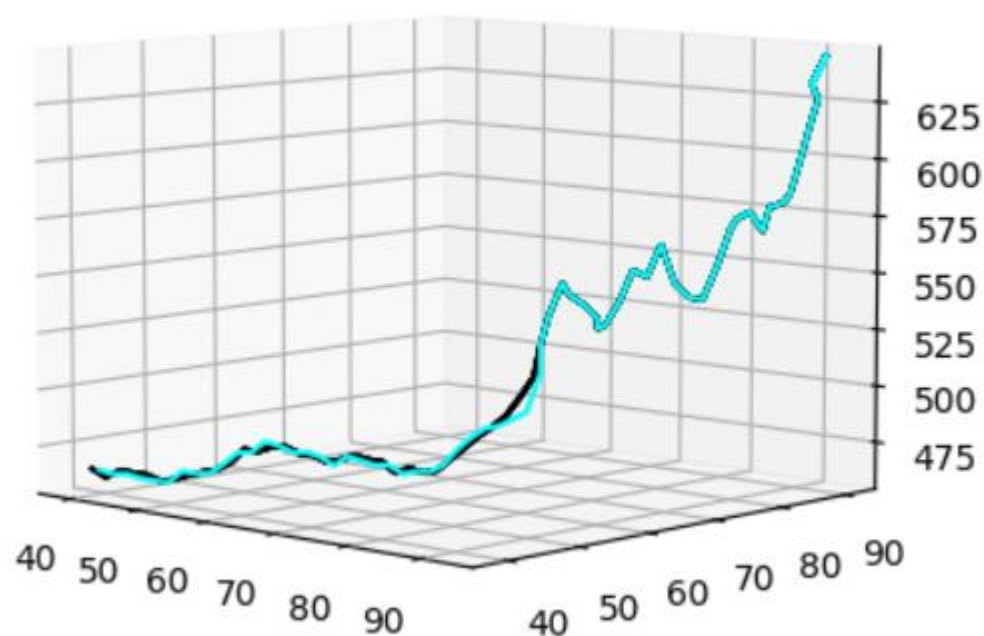
Теперь запустим этих же роботов с теми же исходными данными на гористой местности, чтобы посмотреть, как рельеф может повлиять на конечные траектории. Зададим максимальный угол, на который может двигаться робот – 30 градусов.

Как можно заметить, на первоначальном алгоритме разницы нет. При расчете же траекторий модифицированным алгоритмом мы явно можем увидеть, что роботы двигаются на комфортной друг от друга дистанции, при которой достигается максимальная пропускная способность.



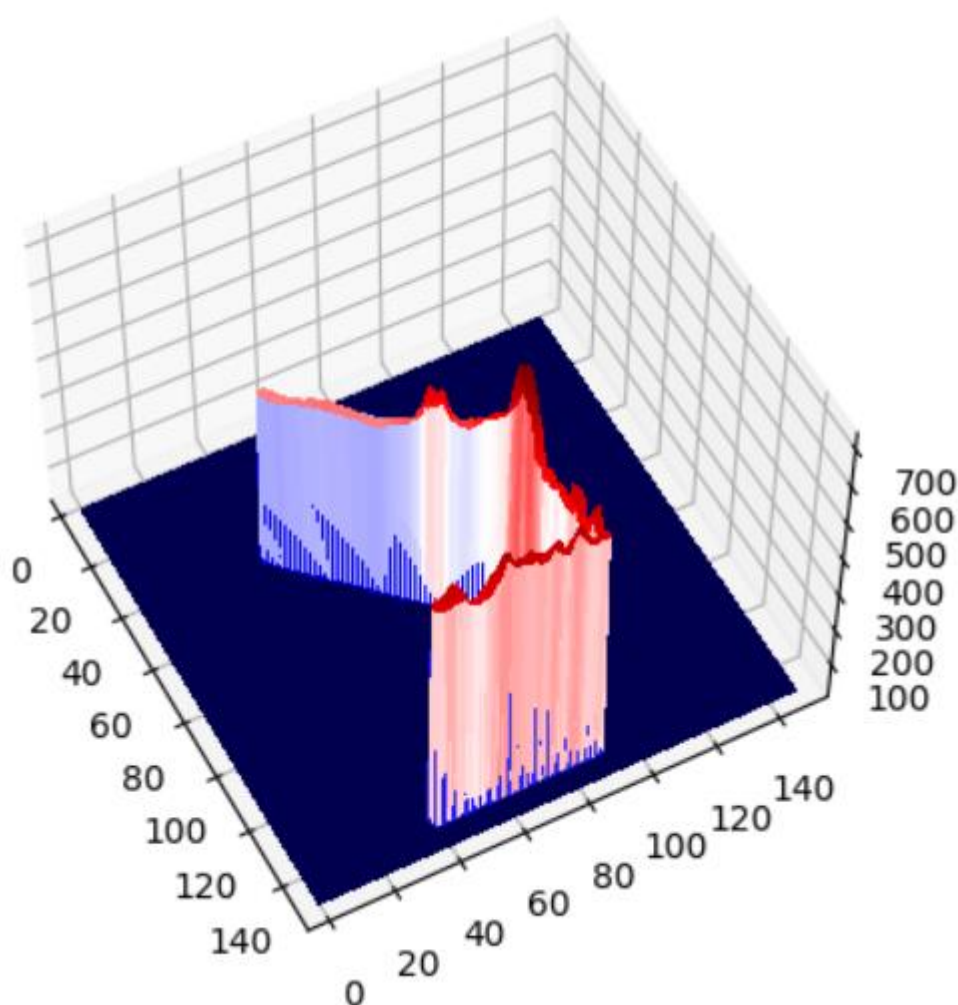


На картинках ниже можно увидеть, как меняются траектории при задании различных углов подъема и спуска. На первом графике мы видим траектории, ведущие в обход резких перепадов, максимальный подъем – 30 градусов. На втором графике мы видим, что роботам нет необходимости обходить горы, так как там максимальный подъем выставлен на 90 градусов, и роботы могут перемещаться хоть по вертикали.



Как было описано выше, алгоритм поддерживает выход из тупиков ситуаций и предупреждения попадания в такие ситуации другими роботами. И

то, и то реализовано за счет того, что система роботов поддерживает надежную связь, что позволяет передавать данные о любом происшествии от каждого робота к каждому, что в свою очередь делает возможным строить карту местности с учетом не только своих датчиков, но и датчиков, находящихся на бортах других роботов. Далее можно увидеть пример построения такой карты на опыте двух роботов. Черным помечены точки, о которых мы ничего не знаем.



Тестирование будем проводить со следующими параметрами:

**Рельеф:** горы, плоскость:

**Количество роботов:** 10, 25, 50

**Размер карты:** 150x150

Основной задачей тестирования является следующее:

- Сравнить пропускную способность на начальном алгоритме без учета параметров и пропускную способность на траекториях уже с корректировками
- Сравнить время прохода всей карты всеми роботами просто с выходом из тупиковых ситуаций с вариантом, в котором такие ситуации предупреждаются с помощью построения карты местности и добавления на нее флажков о непроходимости
- Посмотреть как зависит качество каналов на плоскости местности и при прохождении между горами при простом обходе препятствий и обходе с учетом сетевых параметров
- Исследовать зависимость покрытия карты от числа роботов (время прохождения карты, насколько сильно меняется от кол-ва роботов)

## **5.4. Выводы по главе 5**

В главе были описаны основные реализованные методы, приведены иллюстрации, показаны примеры. Также определены параметры тестирования, выведены цели исследования, поставлены задачи. Теперь можно переходить к непосредственно анализу полученных результатов.

## Глава 6. Анализ полученных данных

В ходе экспериментов было выявлено, что реализованный алгоритм позволяет стабильно поддерживать отказоустойчивую одноранговую беспроводную сеть и обеспечивать движение группы роботов, находящихся в этой сети исключая потери хотя бы одного из роботов.

### 6.1. Влияние корректировок на пропускную способность системы

Были проведены эксперименты на различных рельефах, для экспериментов использовались 5, 10, 25 и 50 роботов, сравнение проводилось в условиях движения без применения каких-либо корректирующих алгоритмов, при применении реализованного алгоритма корректировки, где каждый абонент ищет для путь исключительно для себя, а также при применении алгоритма, в корректировки, где шаг зависит не только от различных параметров, но и от направления движения центрального узла.

Далее представлены таблицы с полученными в ходе тестирования значениями, далее по ним составлены графики.

Время	Пакеты	Пропускная способность	Количество роботов
122	1464	12	5
122	1396	11.44262	10
122	1312	10.7541	25
122	1286	10.54098	50

Время	Пакеты	Пропускная способность	Количество роботов
177	2136	12.0678	5
186	2244	12.06452	10
190	2292	12.06316	25
200	2404	12.02	50

Время	Пакеты	Пропускная способность	Количество роботов
57	696	12.21053	5
64	780	12.1875	10
60	726	12.1	25
80	924	11.55	50

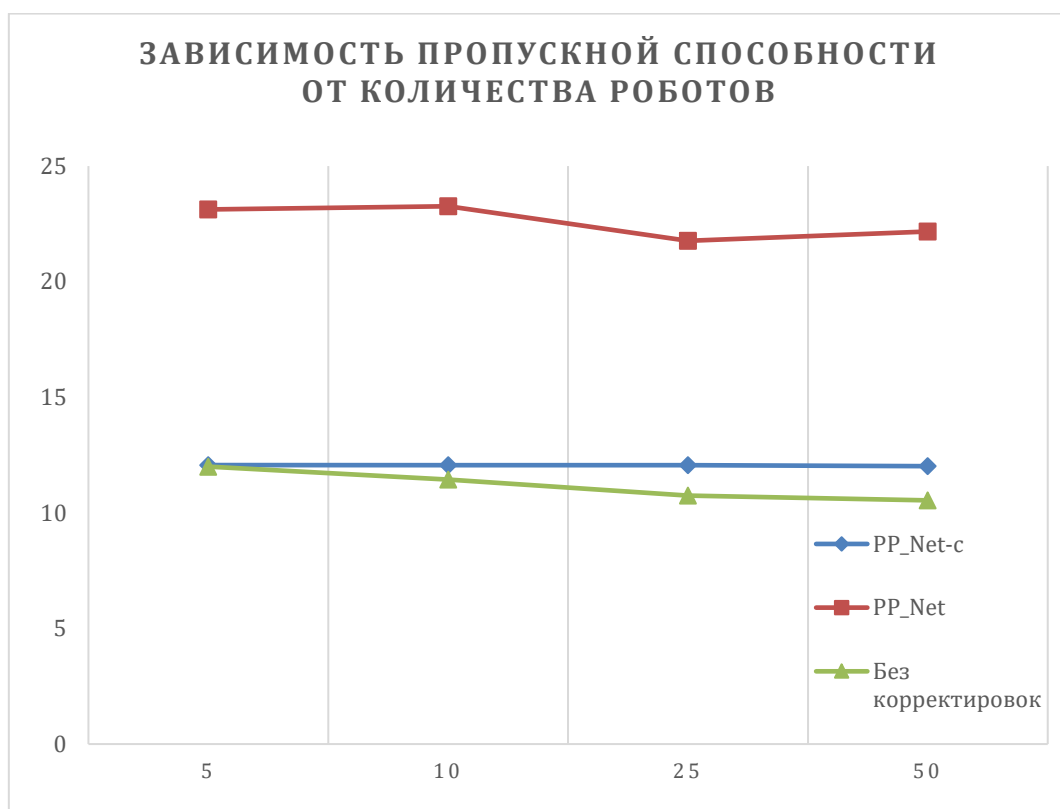
Время	Пакеты	Пропускная способность	Количество роботов
122	1396	11.44262	5
122	1280	10.4918	10
122	1194	9.786885	25
122	1096	8.983607	50

Время	Пакеты	Пропускная способность	Количество роботов
57	2136	37.47368	5
64	2244	35.0625	10
79	2292	29.01266	25
90	2478	27.53333	50

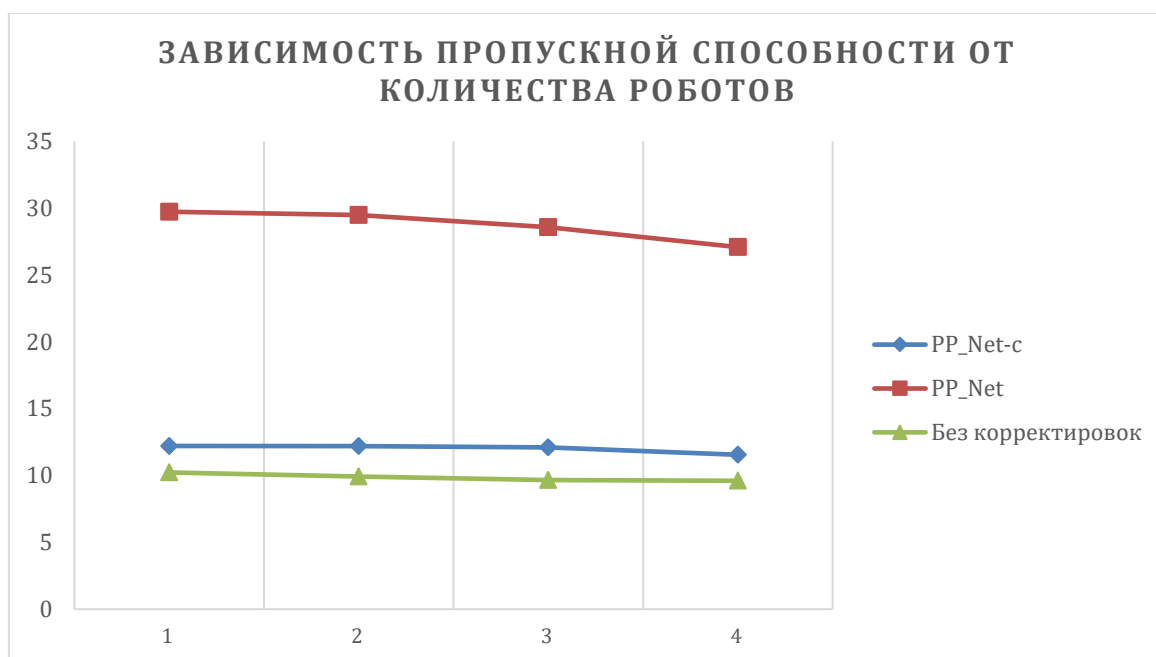
Время	Пакеты	Пропускная способность	Количество роботов
74	2201	29.72973	5

78	2312	29.48718	10
84	2421	28.57143	25
96	2643	27.08333	50

Ниже представлен график зависимости пропускной способности от количества узлов на равнинной карте местности:

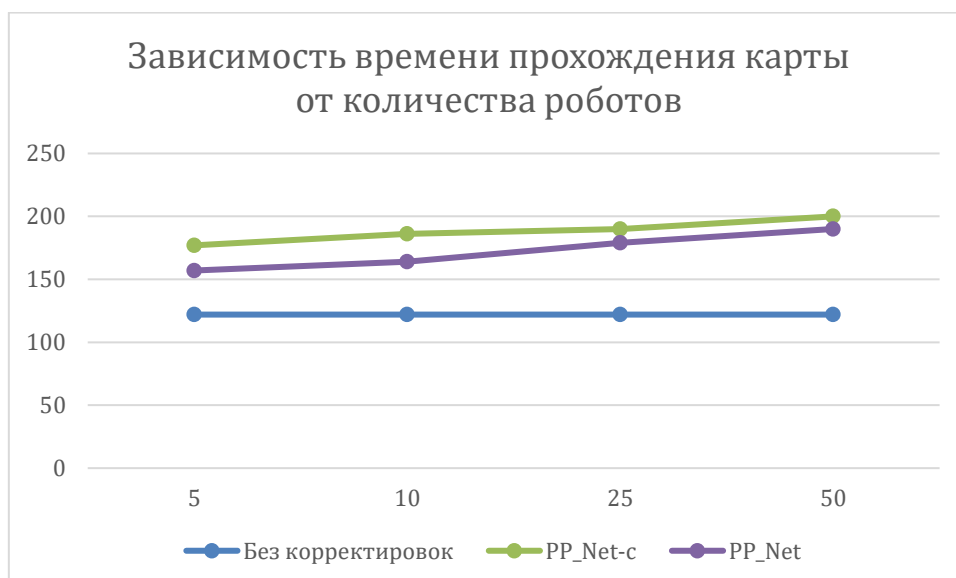


Ниже представлен график зависимости пропускной способности от количества узлов на гористой карте местности:



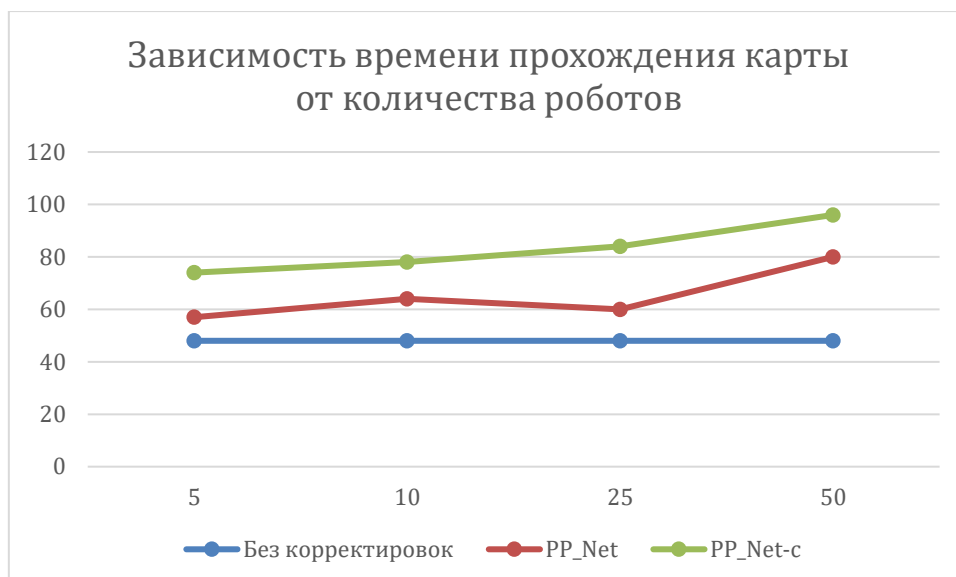
## 6.2. Зависимость времени прохождения карты от количества роботов

На основе полученных выше данных для наглядности также приведены графики зависимости времени прохождения карты группой роботов в зависимости от количества узлов. Ниже представлен график с данными на равнинной местности:



Ниже представлен график с данными на гористой местности:

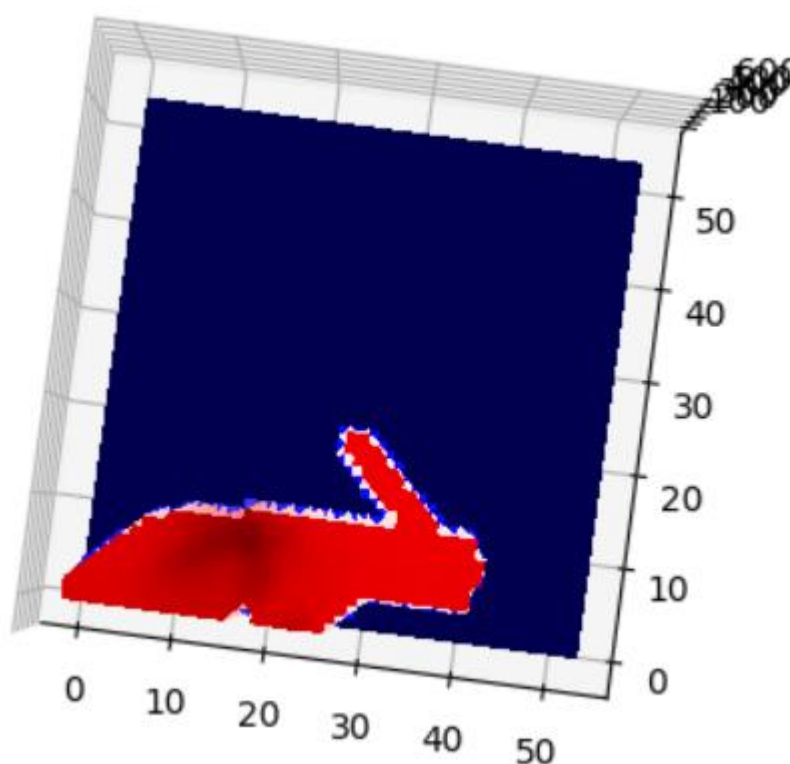




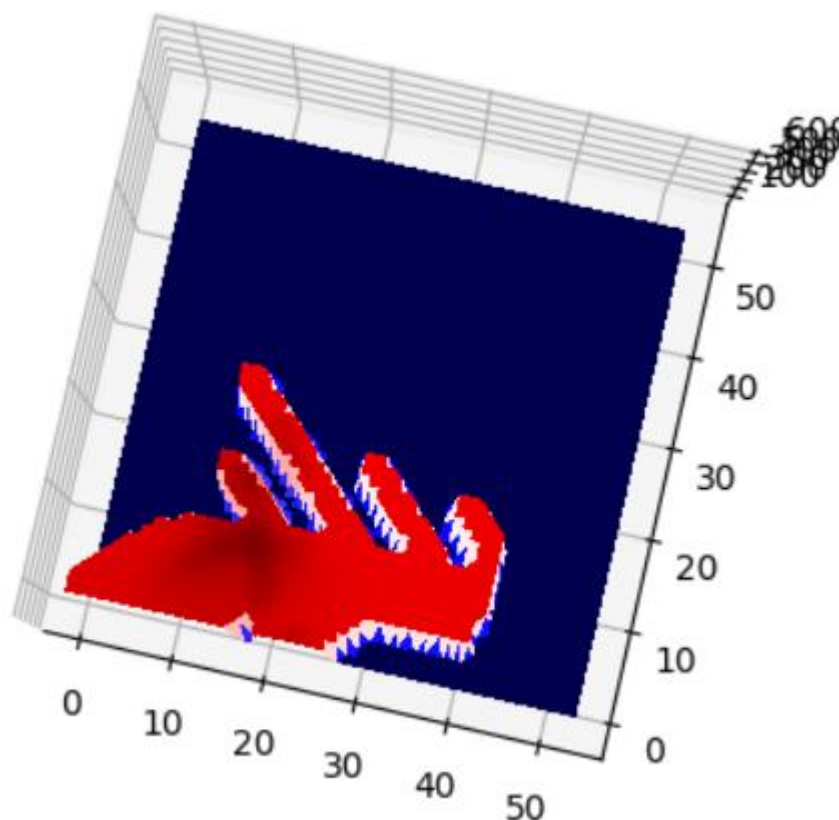
### 6.3. Зависимость восстановления карты роботами в зависимости от их количества

В этом подразделе эксперименты будут проводиться на карте **50x50**. Количество роботов будет меняться от 5 до 25, каждый этап будет проиллюстрирован.

Ниже представлен пример построенной карты, полученная при использовании 10 роботов:



Ниже представлен пример построенной карты, полученная при использовании 15 роботов:



## 6.5. Выводы по главе 6

На основе полученных данных можно сделать следующие выводы:

- Методы, учитывающие сетевые метрики повышают пропускную способность каналов за счет оптимизации числа ретрансляторов и ограничения числа связей. Разница может достигать 250%
- Добавление учета сетевых метрик, действительно, исключает вероятность потери одного из роботов.
- При увеличении числа роботов время движения группы по карте увеличивается
- При удачном расположении конечных и начальных точек можно получить большую карту за меньшее число роботов

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе написания данной работы решены были все поставленные задачи, а именно:

- Разработан алгоритм построения топологии отказоустойчивой одноранговой беспроводной сети;
- Проведено исследование способов представления карты местности;
- Проведено исследование алгоритмов поиска пути;
- Разработан механизм формирования ограничений для поисковых алгоритмов на основе сетевых метрик;
- Разработаны способы построения роботами общей карты местности и корректировки траектории движения роботом на основе данных, собранных другими роботами;
- Подготовлена среда и сценарии для выполнения экспериментов;
- Проведены экспериментальные исследования, сделан анализ результатов, подведены итоги.
- Проведен ряд экспериментов, которые показали следующее:
  - Добавление учета сетевых метрик, действительно, исключает вероятность потери одного из роботов.
  - Методы, учитывающие сетевые метрики повышают пропускную способность каналов за счет оптимизации числа ретрансляторов и ограничения числа связей. Разница может достигать 250%

Чем выше число узлов в ограниченном пространстве, тем меньше пропускная способность различных маршрутов

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- [1] C. Perkins, E. Belding-Royer and S. Das – IETF Request for Comments 3561: Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing. – July 2003. – <http://www.ietf.org/rfc/rfc3561.txt>
- [2] T. Clausen, P. Jacquet – IETF Request for Comments 3626: Optimized Link State Routing Protocol (OLSR). – October 2003. – <https://www.ietf.org/rfc/rfc3626.txt>
- [3] IEEE 802.11s: <https://wireless.wiki.kernel.org/en/developers/documentation/ieee80211/802.11s> (даты обращения: ноябрь 2018 – май 2019)
- [4] ARP: <https://tools.ietf.org/html/rfc826> (даты обращения: ноябрь 2018 – май 2019)
- [5] Самоорганизующиеся mesh-сети: Гусс С.В. Самоорганизующиеся mesh-сети для частного использования // МСМ. 2016. №4 (40). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/samoorganizuyuschiesya-mesh-seti-dlya-chastnogo-ispolzovaniya> (даты обращения: ноябрь 2018 – май 2019)
- [6] Прозоров Д. Е., Метелев А. П., Чистяков А. В., Романов С. В. Протоколы геомаршрутизации самоорганизующихся мобильных сетей // Т-Comm. 2012. №5. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/protokoly-geomarshrutizatsii-samoorganizuyuschih-sya-mobilnyh-setey> (даты обращения: ноябрь 2018-май 2019)
- [7] Network Simulator 3: <https://www.nsnam.org/> (даты обращения: ноябрь 2018 – май 2019)
- [8] Jiang, Daniel & Delgrossi, Luca. (2008). IEEE 802.11p: Towards an International Standard for Wireless Access in Vehicular Environments. IEEE Vehicular Technology Conference. 2036 – 2040. 10.1109/VETECS.2008.458.
- [9] Таненбаум Э. Компьютерные сети. 5-е изд. / Таненбаум Э., Уэзеролл Д. — СПб.: Питер, 2012. — 960 с.

- [10] B.A.T.M.A.N protocol: <https://www.open-mesh.org/projects/open-mesh/wiki/BATMANConcept>
- [11] A Performance Analysis Of Routing Protocols In Mobile Ad-Hoc Networks: <https://www.ijert.org/research/a-performance-analysis-of-routing-protocols-in-mobile-ad-hoc-networks-IJERTV1IS8130.pdf> (даты обращения: ноябрь 2018-май 2019)
- [12] A simple pragmatic approach to mesh routing using BATMAN: <https://pdfs.semanticscholar.org/9f97/e0bc11ed843a4c38bb3fd7c16cd0a4f9d864.pdf> (даты обращения: ноябрь 2018-май 2019)
- [13] Kit Tan, Whye & Lee, Sanggon & Lam, Jun Huy & Yoo, Seong-Moo. (2013). A Security Analysis of the 802.11s Wireless Mesh Network Routing Protocol and Its Secure Routing Protocols. Sensors (Basel, Switzerland). 13. 11553-85. 10.3390/s130911553.
- [14] Abdullah, Ako & Hama Aziz, Roza. (2014). The Impact of Reactive Routing Protocols for Transferring Multimedia Data over MANET. Journal of Zankoy Sulaimani- Part A. 16. 9-24. 10.17656/jzs.10342.
- [15] Vatsa, Avimanyou & , Vishnoi & , Indu & Shukla, Anju. (2011). NOVEL ARCHITECTURE OF DELAY AND ROUTING IN MANET FOR QoS. International Journal of Engineering Science and Technology. 3.
- [16] Sumo (Simulation of Urban Mobility): [https://www.dlr.de/ts/en/desktopdefault.aspx/tabid-9883/16931\\_read-41000/](https://www.dlr.de/ts/en/desktopdefault.aspx/tabid-9883/16931_read-41000/) (даты обращения: ноябрь 2018-май 2019)